

文章编号: 1000-5013(2009)05-0496-06

吊装绳牵引并联起重机器人的建模分析

郑亚青

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 提出一种6自由度的绳牵引并联起重机器人,以取代现有的轨道吊.通过对绳牵引并联起重机器人进行构型配置并建模后发现,其动力学系统是具有8个输入量、6个状态量和输出量的冗余驱动的非线性系统.将非正则反馈线性化控制器引入到该系统中,得到一个线性化的系统.选择适当的输入控制律,即可得到一个关于轨迹误差的二阶常微分方程.在选择合适的反馈增益的基础上,可实现渐近稳定的吊运轨迹跟踪控制.仿真结果表明,吊具在 x 和 y 方向上的轨迹的稳态误差为零,但在 z 方向上的轨迹始终存在一个固定的稳态误差,必须通过改进系统的控制器来解决.

关键词: 集装箱吊装; 轨道吊; 绳牵引; 并联; 起重机器人

中图分类号: TH 213.065

文献标识码: A

高自动化或无人化的场桥是未来的发展趋势.随着我国经济迅速发展,港口也得到相应的发展,不断有大型深水码头建设并启用,即便是码头数量趋于饱和,但其吞吐能力还是有很大的提升空间.未来大规模的作业对现有类型的场桥来说是有很大的局限性的,而原有的旧港设备在使用多年后都面临电气系统老化,需要改造的情况.比如上海振华港机(集团)公司(ZPMC)开发的无人化堆场系统,以及新加坡港现在使用的,在后方遥控操作的行车式的场桥,都需对现有堆场进行改造.对现有设备进行高自动化或无人化改造,其意义还是相当大的,而且轨道吊(RMG)比轮胎吊(RTG)能更好地实现高自动化^[1].本文提出可以用来替代RMG(或RTG)的,用于集装箱吊装的绳牵引并联起重机器人,并对其建模分析与吊运轨迹控制研究.

1 系统描述

上海振华港机(集团)公司(ZPMC)开发的RMG产品^[2],其参数:吊具起重为40 t,额定起升高度为17.8 m,跨距为23.47 m,起升速度为23~52,46~52 m·min⁻¹,小车速度为70 m·min⁻¹,大车运行速度为25,70 m·min⁻¹,装机总功率为600 kW.

设计绳牵引并联起重机器人(暂不考虑大车行走机构),该机构为6自由度的过约束绳牵引并联机构(简称RRPM)^[3],如图1所示.它是能起吊2个40 t的集装箱的吊具,由8根绳牵引,每根绳的另一端分别由一个绞盘牵引,而绞盘由固定在移动小车上的控制电机驱动.吊具可实现6自由度的空间运动,且吊具在竖直方向上的运动能力最灵活.移动小车可在主梁上来回地匀速运动,从而大大扩大吊具的运动范围.

与ZPMC的轨道吊相比,该绳牵引并联起重机器人能起

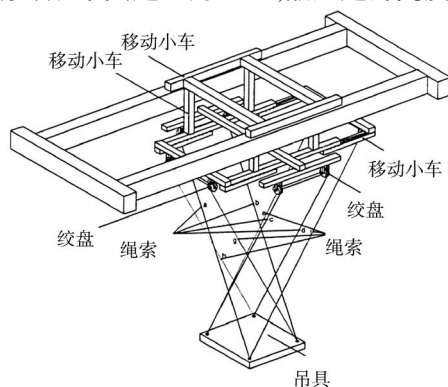


图1 绳牵引并联起重机器人

Fig.1 A wire-driven parallel crane robot

收稿日期: 2008-04-18

通讯作者: 郑亚青(1974-),女,副教授,工学博士,主要从事绳牵引并联机构的研究. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805054)

吊 2 箱以上的集装箱(可根据需要进行配置),在起重上具有更大的优势;也可根据需要改变吊具的起升速度,取吊具的起升速度为 $52\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,在起升速度上具有更大的优势;另外,该机器人实现完全的自动化.

绳牵引并联起重机器人的结构参数,如图 2 所示. 设 $X=(X_P; X_{\text{ang}})^T$ 为吊具的参考点 P 相对于坐标系 $Oxyz$ 的位姿, X_P 为 P 的位置坐标 $(X_P, Y_P, Z_P)^T$, X_{ang} 为坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 相对于坐标系 $Oxyz$ 的姿态坐标 $(\gamma, \beta, \alpha)^T$. 吊具的 3 个姿态角分别为偏航角 γ (相对于 Ox 轴正方向的旋转)、俯仰角 β (相对于 Oy 轴正方向的旋转)和滚转角 α (相对于 Oz 轴正方向的旋转).

已知绳与移动小车的各个连接点为 $B_i(i=1, \dots, 8)$, 其在固定坐标系 $Oxyz$ 下的坐标 $B_i(X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i})$ 分别为: $B_1:(0.5, -0.5, 0)\text{ m}$; $B_2:(0.5, 0.5, 0)\text{ m}$; $B_3:(-0.5, -0.5, 0)\text{ m}$; $B_4:(-0.5, 0.5, 0)\text{ m}$; $B_5:(0.5, -11.735, 0)\text{ m}$; $B_6:(-0.5, -11.735, 0)\text{ m}$; $B_7:(-0.5, 11.735, 0)\text{ m}$; $B_8:(0.5, 11.735, 0)\text{ m}$. 绳与吊具的各个连接点为 $P_i(i=1, \dots, 8)$, 其在局部坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 下的坐标 $p_i(x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i})$ 分别为: $p_1(p_7):(-0.5, -0.5, 0)\text{ m}$; $p_3(p_8):(0.5, -0.5, 0)\text{ m}$; $p_2(p_6):(-0.5, 0.5, 0)\text{ m}$; $p_4(p_5):(0.5, 0.5, 0)\text{ m}$.

2 运动学建模

2.1 位置逆解

图 2 所示的绳牵引并联起重机器人,其运动学模型定义如图 3 所示. 其中, $l_i(i=1, \dots, 8)$ 是沿第 i 根绳的向量, $l_i = P_iB_i = B_i - P_i$, 该向量的模与绳长是相同的. 第 i 根绳的长度用变量 l_i 表示, u_i 是沿第 i 根绳的单位向量. B_i 和 P_i 分别为第 i 根绳与机架和吊具的 2 个点状铰链点, 这 2 个点状铰链点的位置分别用向量 a_i 和 r_i 表示. 显然, a_i 在固定坐标系 $Oxyz$ 里是常向量, 且 $a_i = OB_i = (X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i})^T$, 而 r_i 在活动坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 里是常向量, $r_i = PP_i = (x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i})^T$. $R_{xyz}(\gamma, \beta, \alpha)$ (简称 R) 是活动坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 绕固定坐标系 $Oxyz$ 的 3 个轴(Ox - Oy - Oz)依次旋转得到的旋转矩阵.

刚开始时,活动坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 的 3 个轴(Px_P, Py_P, Pz_P)分别与固定坐标系 $Oxyz$ 的 3 个轴(Ox, Oy, Oz)重合;然后,活动坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 按照顺序,相对于固定坐标系 $Oxyz$ 的坐标轴进行旋转变换而得到的. 即活动坐标系 $Px_Py_Pz_P$ 先绕 Ox 轴 γ ,再绕 Oy 轴 β ,最后绕 Oz 轴 α ,则有

$$\begin{aligned} R_{xyz}(\gamma, \beta, \alpha) &= R = R_z(\alpha) R_y(\beta) R_x(\gamma) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \alpha \cos \gamma & \cos \beta \cos \alpha \sin \gamma & \cos \beta \sin \alpha \\ \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma & \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta \cos \gamma & -\sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

基于以上的运动学符号,吊具的位置坐标 X_P 可描述为

$$X_P = P = a_i + l_i - Rr_i, \quad i = 1, \dots, 8. \tag{1}$$

由此可得

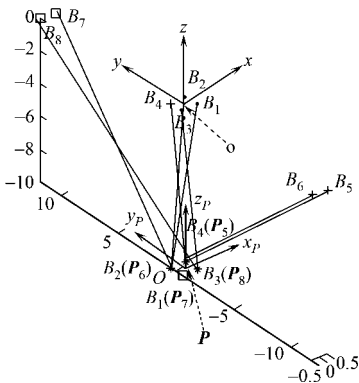


图 2 结构参数

Fig. 2 Structural parameters

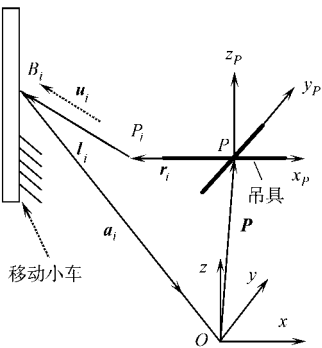


图 3 运动学符号定义

Fig. 3 Definition of kinematic notations

式(7)中,绳长向量 $l = (l_1, \dots, l_8)^T \in \mathbb{R}^8$, 驱动器的惯性矩阵 $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_8) \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$, 驱动器粘性摩擦系数矩阵 $B = \text{diag}(b_1, \dots, b_8) \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$, 驱动器的力向量 $u = (u_1, \dots, u_8)^T \in \mathbb{R}^8$, 绳拉力向量 $T = (t_1, \dots, t_8)^T \in \mathbb{R}^8$.

4.3 吊具动力学模型

吊具动力学模型表达式为

$$\frac{d}{dt}(M_0 \cdot \dot{X}) = F - F_G, \quad (8)$$

即

$$M_0 \ddot{X} + \dot{M}_0 \dot{X} = F - F_G.$$

其中,吊具的惯性矩阵 $M_0 = \begin{bmatrix} (m_P I)_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A_{G(3 \times 3)} \end{bmatrix}$, m_P 是吊具的质量, A_G 是吊具关于重心的惯性矩, X

是吊具的位姿. F 是由绳拉力所引起的作用在吊具的外力螺旋,满足 $F = J^T T$. 其中, J 是绳牵引并联机构的 Jacobi 矩阵,满足 $\dot{l} = J \dot{X}$. $F_G = (0, 0, m_P \cdot g, 0, 0, 0)^T$, 是吊具的重力向量,其中, $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

4.4 整体动力学模型

由式(7), (8)可推导得系统的整体动力学模型,有

$$(M_0 + J^T M J) \ddot{X} + (\dot{M}_0 + J^T M \dot{J} + J^T B J) \dot{X} = J^T u - F_G, \quad (9)$$

记 $D(X) = M_0 + J^T M J$, $C(X, \dot{X}) = \dot{M}_0 + J^T M \dot{J} + J^T B J$, $h(X) = F_G$. 方程(9)可写成

$$D(X) \ddot{X} + C(X, \dot{X}) \dot{X} = J^T u - h(X). \quad (10)$$

绳牵引并联起重机器人的动力学模型是高度耦合的非线性系统,而且冗余驱动引入了过约束.因此,在设计控制方案时,必须对动力学模型进行线性化和解耦处理.

5 吊具的吊运轨迹控制

5.1 非正则反馈线性化

式(10)表明,该绳牵引并联起重机器人系统是非线性的冗余驱动系统,要将其线性化,必须采用非正则反馈线性化控制器.

非线性系统的反馈线性化的基本思路是,构造一个非线性的控制律作为内控制环.在理想的情况下,经一些合适的状态空间坐标变换能精确地线性化非线性系统,可以在新坐标系里设计一个外环控制以满足传统控制设计要求^[5-8]. 对于一个8个输入量和6个输出量的非线性系统(6自由度冗余驱动绳牵引并联机器人系统),系统动力学方程可写成

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X} &= f(X) + \sum_{i=1}^8 g_i(X) u_i = f(X) + G(X) u, \\ X &\in \mathbb{R}^6, \quad u = (u_1, \dots, u_8)^T \in \mathbb{R}^8. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中, $f(X)$ 和 $g_i(X)$ 是 \mathbb{R}^6 上的光滑向量场, $g_i(0) = 0$, 而 $G(X) \in \mathbb{R}^{6 \times 8}$. 因为 \mathbb{R}^8 上存在严格包括原点的区域,则 \mathbb{R}^6 是实现非正则反馈线性化的.

定义一系列新的状态坐标为 $z = \phi(X)$. 其中, $\phi(X)$ 是一个微分同胚,即可逆的且无限可微的函数组.系统动力学方程可用一组新的反馈 v 来线性化,有

$$\dot{z} = Az + Bv. \quad (12)$$

式(12)中, v 和非线性反馈 α 的关系可表达为

$$v = \alpha(X) + \beta(X) \alpha. \quad (13)$$

式(13)中, $\alpha(0) = 0$, $\alpha(X) \in \mathbb{R}^8$, $\beta(X) \in \mathbb{R}^{8 \times m}$, $m < 8$.

5.2 非正则反馈线性化控制器控制

将非正则反馈线性化的思想应用到式(10)中,给出控制律,有

$$u = (J^T(X))^{-1} (C(X, \dot{X}) \dot{X} + h(X)) + (J^T(X))^{-1} D(X) v, \quad (14)$$

式(14)中, $(J^T(X))^{-1} \in \mathbb{R}^{8 \times 6}$, $(C(X, \dot{X}) \dot{X} + h(X)) \in \mathbb{R}^6$, $D(X) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$.

式(10)变为 $\ddot{X} = v$, $v \in \mathbb{R}^6$, 可写成

$$\ddot{v} = \ddot{X}_d - K_P \dot{X} - K_D \ddot{X}, \quad \dot{X} = \dot{X}_d - K_P X - K_D \dot{X}.$$

定义误差 $\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d$, 则线性化系统的 Laplace 形式, 有 $s^2 \mathbf{X}(s) + s K_D \mathbf{X}(s) + K_P \mathbf{X}(s) = 0$. 消去 $\mathbf{X}(s)$, 则线性化系统的特征方程可写成

$$s^2 + s K_D + K_P = 0.$$

计算特征方程的根为 $s_1 = -\frac{1}{2} K_H + \frac{1}{2} \sqrt{K_D^2 - 4 K_P}$, $s_2 = -\frac{1}{2} K_D - \frac{1}{2} \sqrt{K_D^2 - 4 K_P}$, 任何正的 K_D 都可以使系统稳定. 选择不同的 K_P 和 K_D 值将影响控制器的性能.

6 数值仿真

在 Matlab/ Simulink 下, 编程仿真以验证非正则反馈线性化控制器, 其主程序框图如图 5 所示. 选择 2 组 K_P 和 K_D 来进行仿真, 仿真结果如图 6 所示. 图 6 中, 第 1 组的增益 $K_P = 10$, $K_D = 4$; 第 2 组的增益 $K_P = 400$, $K_D = 100$.

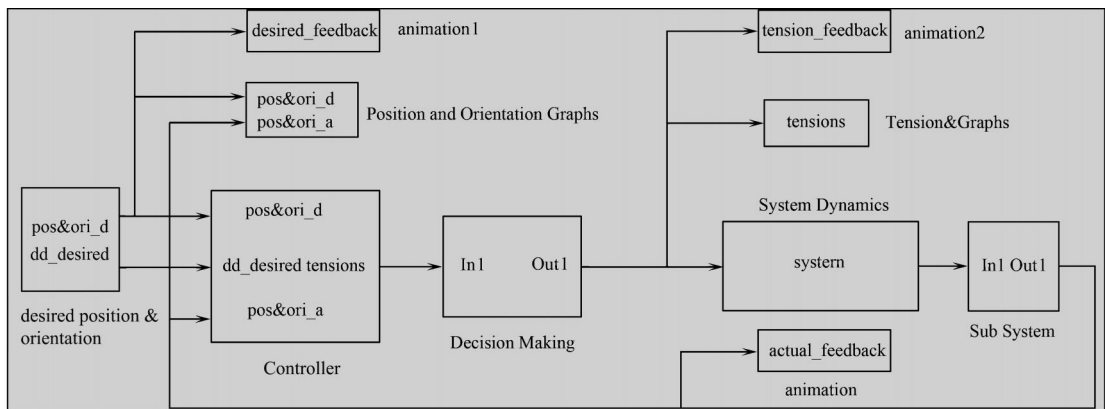


图 5 非正则反馈线性化仿真的方框图

Fig. 5 Block diagram of simulation of non-regular feedback linearization

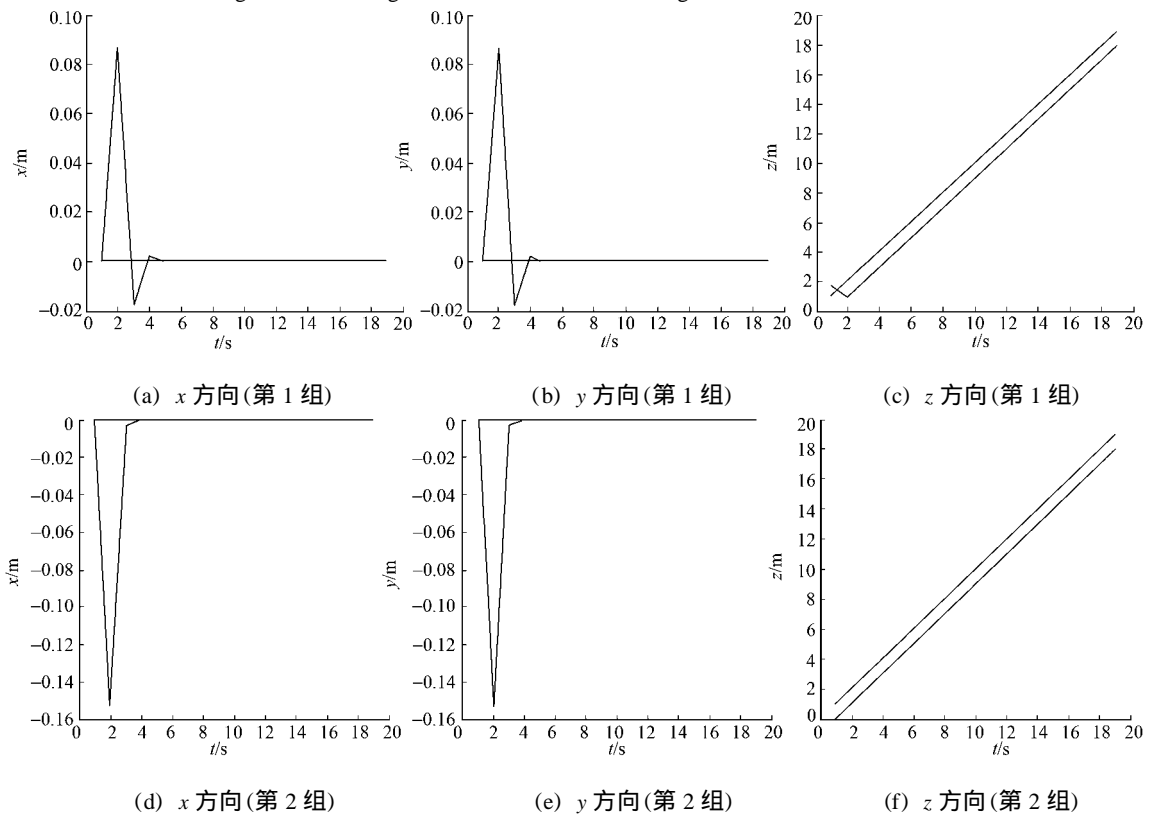


图 6 吊具的实际与期望位姿

Fig. 6 Real and desired trajectories of the spreader

从图6的仿真结果可以看出,增益 K_P , K_D 值越大,则吊具的实际位姿达到稳定值的时间越短;但增益 K_P 和 K_D 值不能取得太大,否则,所设计的控制器会很昂贵. 吊具沿 O_z 方向的实际位移值始终与期望值存在一个稳定的误差值,必须通过改善控制器来进行修正.

7 结束语

提出用于集装箱吊装的绳牵引并联起重机器人,旨在对现有的 RMG 进行改进. 在不考虑绳的弹性变形条件下,对绳牵引并联起重机器人进行理论研究及仿真. 仿真结果表明,应改进控制器以获得更好的吊运轨迹跟踪性能.

参考文献:

- [1] 李书梁. 轨道式集装箱门式起重机的现状[J]. 起重运输机械, 2002(1): 5-6.
- [2] 张德文, 谢琛, 陈丽昕. 轨道式集装箱门式起重机的技术分析[J]. 港口装卸, 2005(5): 43-47.
- [3] BOSTELMAN R V, GOODWIN K. Survey of cargo handling research relative to the mobile offshore base (MOB) needs[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1999: 30-31.
- [4] 胡龙, 郑亚青, 林麒, 等. 低速风洞绳牵引并联机构的动力学分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 184-189.
- [5] ZHENG Ya-qing. Feedback linearization control of a wire-driven parallel support system in wind tunnels[C]. Proceedings of Sixth International Conference on Intelligent System Design and Applications. Jinan: [s. n.], 2006: 9-13.
- [6] CHENG Dai-zhan, HU Xiao-ming, WANG Yu-zhen. Non-regular feedback linearization of nonlinear systems via a normal form algorithm[J]. Automatica, 2004, 40(3): 439-447.
- [7] SUN Zhen-dong, XIA Xiao-hua. On nonregular feedback linearization[J]. Automatica, 1997, 33(7): 1339-1344.
- [8] ZHONG J, KARASALO M, CHENG D, et al. New results on non-regular linearization of non-linear systems[J]. International Journal of Control, 2007, 80(10): 1651-1664.

Modeling of A Wire-Driven Parallel Crane Robot for Containers Handling

ZHENG Ya-qing

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: A 6-degree-of-freedom wire-driven parallel crane robot for containers handling replacing rail-mounted gantry cranes is presented. The mechanism configuration of the wire-driven parallel crane robot is given. After the modeling of the crane robot system, it is found that its dynamic modeling is a redundantly actuated nonlinear system with 8 inputs, 6 states and 8 outputs. A non-regular feedback linearization controller is used to linearize the system and an ordinary differential equation about the error trajectory of the payload is obtained after the use of a suitable input control law for the linearized system, which the asymptotical stability of the trajectory tracking of the payload can be realized if the feedback gains are selected. The simulation results have shown that the steady-state errors of the tracking trajectory along x and y directions tend to zero and that along z direction keeps a constant value which should be eliminated by improving the controller.

Keywords: containers handling; rail-mounted gantry cranes; wire-driven; parallel; crane robot

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)